

METODI EURISTICI PER LA GESTIONE ENERGETICA OTTIMALE A BORDO DI UN VEICOLO IBRIDO SOLARE

Rizzo, G., Sorrentino, M., Arsie, I., Coraggio, G., Pisanti, C.

Dipartimento di Ingegneria Meccanica
Università di Salerno 84084 Fisciano (SA)

SOMMARIO

Nella memoria viene proposta una strategia di controllo rule-based (RB) per la gestione energetica ottimale a bordo di un veicolo ibrido solare (Hybrid Solar Vehicle – HSV) con struttura serie.

L'architettura di controllo RB è costituita da due loop principali: uno esterno, che determina, in funzione del contributo solare atteso durante la fase di parcheggio, lo stato di carica della batteria (SOC) da raggiungere al termine della fase di guida; il secondo, interno, i cui obiettivi sono, da una parte, l'individuazione dello scheduling ottimale del gruppo generatore, e, dall'altra, il controllo dell'oscillazione del SOC intorno al valore finale indicato dal primo ciclo.

Al fine di massimizzare il risparmio di combustibile ottenibile da una architettura serie, si è optato per un funzionamento intermittente del propulsore tradizionale (ICE). Pertanto, il secondo ciclo fornisce la potenza media da far erogare all'ICE in funzione dei valori medi di potenza richiesta alle ruote e potenza solare. La potenza mediamente richiesta per la trazione può essere stimata utilizzando modelli previsionali a rete neurale, nonché i dati precedentemente memorizzati dalla centralina di controllo od ancora le informazioni derivate dal GPS. Il contributo solare previsto può essere invece stimato partendo da database solari già disponibili ovvero attraverso un opportuno processamento dei dati acquisiti a bordo.

Le prestazioni ottenibili dall'architettura RB sono state analizzate attraverso un'approfondita analisi di simulazione. Si è anche effettuato un confronto fra i consumi simulati con la strategia RB e quelli ottenuti attraverso un'analisi di ottimizzazione di tipo batch basata su Algoritmi Genetici (Genetic Algorithms – GA). Tale confronto porta a concludere l'elevata potenzialità offerta dalla strategia RB proposta per eseguire in tempo reale la gestione energetica su veicoli ibridi solari.

L'algoritmo di controllo RB è attualmente in fase di implementazione su un'unità di controllo NI® cRIO, con l'obiettivo di validare sperimentalmente i risultati numerici su un prototipo HSV sviluppato dall'Università di Salerno.

INTRODUZIONE

Negli ultimi anni, c'è una crescente consapevolezza circa la necessità di raggiungere una maggiore mobilità sostenibile, che consenta di soddisfare i bisogni di mobilità del presente senza compromettere l'abilità delle generazioni future di soddisfare le loro esigenze [1]. I motivi che spingono verso nuove soluzioni per la mobilità personale sono i seguenti:

- i combustibili fossili, in gran parte utilizzati per le automobili, sono condannati a esaurimento, e il loro prezzo è soggetto a grandi e imprevedibili fluttuazioni (vedi Figura 1);

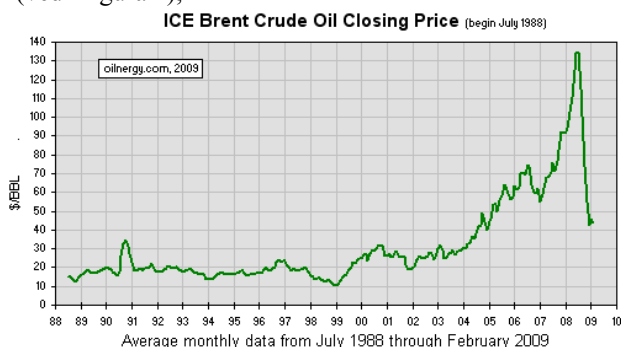


Figura 1 – Andamento del prezzo del petrolio (<http://www.oilnergy.com/lobrent.htm>).

- le emissioni di CO₂ generate dai processi di combustione che si verificano nei motori termici convenzionali contribuisce all'effetto serra, con pericolosi e forse drammatici effetti sul riscaldamento globale e sui cambiamenti climatici;

- la domanda mondiale per la mobilità è in rapida crescita, soprattutto in Cina (vedi Figura 2) e India; di conseguenza, il consumo di energia e le emissioni di CO₂ legate a automobili e trasporti sono in aumento.

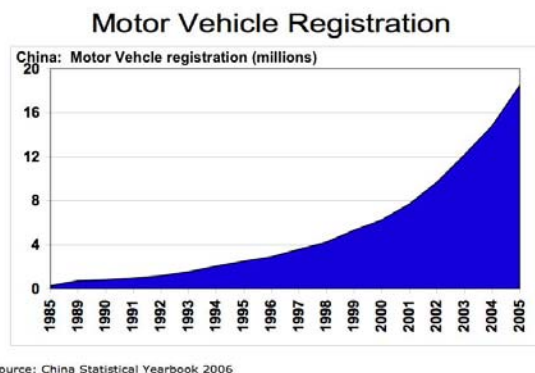


Figura 2 - Veicoli a motore registrati in Cina (Milioni).

Nel breve periodo i veicoli ibridi elettrici (i.e. Hybrid Electric Vehicles – HEV) rappresentano senza dubbio la soluzione più promettente ai problemi energetico-ambientali connessi alla mobilità nei centri urbani. Gli HEV, giunti ormai ad uno stadio di evoluzione maturo, permettono di ridurre i consumi, e di conseguenza le emissioni di gas serra, nonostante si basino sull'utilizzo di combustibili fossili. Negli ultimi anni, però, c'è una crescente attenzione per le applicazioni di energia solare ed elettrica anche per le auto ibride. Ma, mentre i veicoli puramente solari non rappresentano ancora una concreta

alternativa alle normali autovetture, il concetto di auto ibrida elettrica assistita da pannelli solari appare più realistico. Le ragioni per lo studio e lo sviluppo di un veicolo ibrido solare possono quindi essere riassunte come segue:

- l'energia solare è rinnovabile, gratuita e largamente diffusa, e i pannelli fotovoltaici sono soggetti a un continuo progresso tecnologico in termini di efficienza delle celle. La loro diffusione è in rapida ascesa, mentre il loro costo, dopo un calo continuo ed una successiva inversione di tendenza verificatasi nel 2004, presenta di nuovo un trend decrescente [2];
- le auto solari, a dispetto di alcuni risultati spettacolari raggiunti nelle competizioni come il World Solar Challenge, non rappresentano una alternativa pratica alle auto convenzionali, a causa di limitazioni di potenza massima, portata, dimensioni e costi;
- la possibilità di combinare la tecnologia HEV all'energia solare porta a benefici energetici molto interessanti.

Nei capitoli successivi, sono presentate le potenzialità e i problemi legati alla tecnologia dei Veicoli Ibridi Solari e vengono discussi alcuni aspetti specifici di controllo di tali veicoli, sulla base di precedenti lavori. Viene proposto, poi, un nuovo approccio definito rule-based (RB) utile alla gestione del flusso di energia. I risultati ottenuti implementando la strategia RB in un modello dinamico longitudinale verranno confrontati con quelli derivanti da una strategia ottimale individuata mediante Algoritmi Genetici. Infine, sono presentate e discusse alcune prove sperimentali preliminari.

VEICOLI IBRIDI SOLARI

In linea di principio, i Veicoli Ibridi Solari (HSV) potrebbero sommare i vantaggi degli HEV e dell'energia solare attraverso un'opportuna integrazione di pannelli fotovoltaici con un veicolo ibrido elettrico. Ma sarebbe riduttivo considerare lo sviluppo di un HSV come la semplice aggiunta di pannelli fotovoltaici ad un veicolo ibrido elettrico. In realtà, l'esempio degli HEV, nonostante il loro sviluppo si sia basato su tecnologie ben note, dimostra come sia necessario condurre attività di ricerca mirate per ottimizzare la configurazione del powertrain, da una parte, e, dall'altra, per individuare strategie di controllo e di gestione energetica più adatte.

Analogamente, al fine di massimizzare i benefici provenienti dall'integrazione del fotovoltaico con la tecnologia HEV, è necessario eseguire accurate riprogettazioni e ottimizzazioni di tutto il sistema di propulsione. In tali veicoli, infatti, ci sono molti legami tra flussi di energia, dimensionamento dei componenti del sistema di propulsione, dimensione del veicolo, prestazioni, peso e costi. Tali interrelazioni sono tra l'altro maggiormente critiche se confrontate con quelle caratterizzanti i veicoli convenzionali od anche ibridi classici. Un'altra differenza tra HEV e HSV riguarda la loro struttura. In realtà, le architetture più utilizzate per HEV sono parallelo e serie-parallelo, mentre nel caso di HSV quella in serie sembra la struttura più adatta [3]. Nonostante alcuni noti svantaggi (e.g. maggiori inefficienze dovute alla presenza di un maggior numero di stadi di conversione energetica), la struttura serie è più semplice e può offrire alcuni vantaggi:

- è più adatta per il plug-in e applicazioni vehicle-to-grid (V2G) [3]. In questo caso il generatore può essere utilizzato come cogeneratore quando il veicolo è parcheggiato a casa.
- Siccome non ci sono collegamenti meccanici tra il generatore e le ruote, è più semplice isolare le vibrazioni e avere meno vincoli per il layout del veicolo.

- Il motore può funzionare a punto fisso, facilitando l'introduzione di tecniche avanzate per la riduzione del rumore (i.e. riduzione del rumore attivo).
- Diventano utilizzabili quei propulsori solitamente progettati per un funzionamento steady-state, quali motori a carica stratificata e micro turbina a gas ecc. (i quali sono invece inadatti per i veicoli classici a causa della mancanza di stabilità o della scarsa efficienza in tutta la gamma di funzionamento).
- È compatibile con l'impiego di motori elettrici in-wheels dotati di controllo di trazione e antiscivolo.
- La configurazione serie agisce come *trait d'union* verso l'introduzione di veicoli ibridi a cella a combustibile.

Un possibile lay-out di un HSV con struttura serie è presentato in Figura 3. I pannelli fotovoltaici PV sono generalmente o integrati o montati sul tetto del veicolo [3][4].

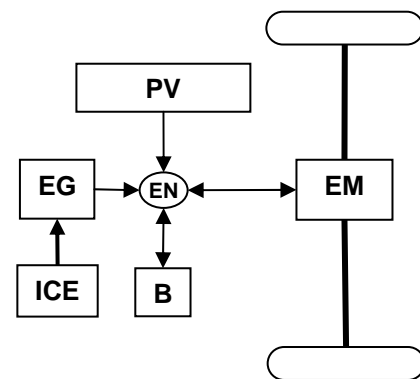


Figure 3 - Schema di un veicolo ibrido solare.

Nonostante le prospettive incoraggianti elencate in precedenza, l'uso di energia solare sulle auto è stata considerata con un certo scetticismo dalla maggior parte degli utenti, compresi gli ingegneri automobilistici. Ciò può essere dovuto alla semplice constatazione che la potenza netta raggiungibile su un'auto con gli attuali pannelli fotovoltaici è di circa due ordini di grandezza inferiore alla potenza nominale degli attuali propulsori termici. Ma una più attenta analisi dell'energia utilizzata dimostra che questa percezione può essere fuorviante. Infatti, vi è un gran numero di conducenti che utilizzano quotidianamente la propria auto per brevi spostamenti e con una potenza mediamente richiesta per la trazione limitata. Ad esempio, alcuni studi recenti [5] indicano che circa il 71% degli utenti del Regno Unito raggiungono il loro ufficio in auto, e il 46% di essi percorrono tragitti più brevi di 20 minuti, la maggior parte con una sola persona a bordo.

In tali condizioni, l'energia raccolta dai pannelli solari in auto durante il giorno, può rappresentare una parte significativa dell'energia necessaria per la trazione [6][7][8].

Nonostante il loro potenziale interesse, le auto ibride solari hanno ricevuto relativamente poche attenzioni in letteratura [3], in particolare se confrontate al grande sforzo speso negli ultimi anni per le altre soluzioni, come le automobili a idrogeno, le cui prospettive sono affette da problemi critici, quali la produzione, la distribuzione e lo stoccaggio. Alcuni prototipi solari sono stati sviluppati negli ultimi dieci anni in Giappone [9], nel Western Washington University [10], presso la Queensland University [11] e, più recentemente, da parte della società francese Venturi.

Un prototipo di Solar Prius è stato inoltre recentemente sviluppato da Solar Electric Vehicles, ed è dotato di un pannello PV con un'efficienza nominale del 16% [4]. È stato

stimato che il veicolo può avere un'autonomia di funzionamento, basata sull'energia solare, compresa tra le 5 e le 8 miglia al giorno, e che si può consumare tra il 17% e il 29% in meno di benzina rispetto alla normale Prius.

CONTROLLO DEI VEICOLI IBRIDI SOLARI

Sebbene gli HSV abbiano molti punti in comune con gli HEV, per i quali sono stati presentati nell'ultima decade numerosi studi sulla gestione e il controllo **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**[13][14][15] ci sono anche alcune differenze significative tra questi tipi di veicoli. In particolare, la presenza di pannelli solari e l'adozione di una struttura serie può rendere necessario studiare e sviluppare soluzioni specifiche per ottimizzare la gestione e il controllo di un HSV.

Come è noto, nella maggior parte degli HEV è stata adottata una strategia di sostentamento della carica: alla fine di un percorso di guida l'obiettivo è quello di ripristinare lo stato di carica della batteria iniziale. Con un HSV si deve tener conto della ricarica delle batterie, attraverso PV, durante le ore di parcheggio. In questo caso, l'obiettivo è quindi quello di ripristinare lo stato iniziale di carica entro la fine dell'intera giornata (i.e. ore di guida + ore di parcheggio), piuttosto che dopo un percorso di guida [8].

Inoltre, la configurazione serie suggerisce di far funzionare il motore in un modo intermittente ed a punto fisso, ossia in corrispondenza del minimo consumo di combustibile. In tal caso, il sistema ICE-EG può essere progettato e ottimizzato per massimizzare l'efficienza, le emissioni e il rumore nel punto di lavoro, mentre negli attuali motori automobilistici la massima efficienza di solito è sacrificata alla necessità di garantire stabilità e buone prestazioni in tutte le condizioni di funzionamento. Nel caso di funzionamento intermittente dell'ICE bisogna tener conto degli effetti su consumi ed emissioni imputabili al verificarsi di transitori termici nel motore e nel catalizzatore [8][16][17]. Questi effetti sono trascurati in molti studi su HEV[15] e su HSV [18].

Al fine di affrontare le suddette problematiche di controllo, negli ultimi anni gli autori hanno effettuato diverse analisi offline volte a individuare le strategie per la gestione ottimale dell'energia su veicoli HSV serie [8][17][19][20]. In particolare in questo lavoro, gli interessi e gli obiettivi della ricerca riguardano lo sviluppo di una strategia di controllo RB per eseguire una gestione energetica quasi-ottimale a bordo di un HSV serie.

STRATEGIA DI CONTROLLO RULE-BASED PER UN VEICOLO IBRIDO SOLARE SERIE

L'architettura di controllo RB è costituita da due loop, uno esterno e l'altro interno:

- Il loop esterno: definisce lo stato di carica finale desiderato SOC_f (vedi Figura 4), che deve essere raggiunto alla fine del ciclo di guida per consentire il completo stoccaggio di energia solare captata durante la successiva fase di parcheggio (cioè, $E_{PV,p}$).
- Il loop interno: stima la potenza media erogata dal gruppo ICE-EG e la deviazione del SOC ($dSOC$) dal SOC_f in funzione della potenza media di trazione \bar{P}_{tr} ed $E_{PV,p}$.

La Figura 4 fornisce una descrizione qualitativa della strategia start&stop introdotta per effetto dei loop appena descritti. Per ragioni di semplicità, nella Figura 4 si assume che $SOC_0=SOC_f$ e \bar{P}_{tr} non varia col tempo. La batteria è inizialmente scarica fino a che il SOC diventa inferiore a $SOC_{i0}=SOC_f-dSOC$. A questo punto ICE-EG viene attivato al

livello di potenza assegnato e si spegne successivamente non appena lo stato di carica raggiunge la soglia massima $SOC_{up}=SOC_f+dSOC$. La procedura si ripete fino alla fine del ciclo di guida. È opportuno evidenziare che lo stato di carica finale effettivo può essere diverso da quello desiderato (SOC_f) a causa della difficoltà di prevedere con precisione la fine della fase di guida. Questa considerazione comporta che sia rispettato il seguente vincolo energetico:

$$\Delta SOC_{up} + \Delta SOC_p < 1 \quad (1)$$

dove ΔSOC_p rappresenta l'aumento dello stato di carica successivo alla ricarica della batteria da parte dei pannelli PV durante il parcheggio.

La strategia di controllo descritta si basa, da un lato, sulla stima on-line del livello attuale del SOC e, dall'altro, sulla possibilità di prevedere o stimare correttamente \bar{P}_{tr} su un percorso di guida assegnato. Le seguenti sotto sezioni descrivono nel dettaglio le regole definite in entrambi i loop (i.e. esterno ed interno).

REGOLE DEL LOOP ESTERNO

Come spiegato in precedenza, l'obiettivo del loop esterno è quello di garantire che tutta l' $E_{sun,p}$ disponibile venga immagazzinata nella batteria una volta terminata la fase di guida. Ciò può essere ottenuto imponendo che SOC_f sia sempre inferiore a 1. Tale vincolo può essere espresso come segue:

$$SOC_f = 0.9 - \frac{\Delta SOC_{max,d}}{2} - \Delta SOC_p \quad (2)$$

dove $\Delta SOC_{max,d}$ è la variazione massima consentita alla batteria durante la fase di guida, qui assunta pari a 0.1. Secondo l'equazione (2), alla fine della giornata SOC non potrà mai superare 0.9, in modo da consentire una ricarica soddisfacente della batteria da parte dei pannelli PV anche nel caso in cui l'auto non venga utilizzata nel corso di un intero giorno (e.g. la fase di guida h_{car} vale 0 ore).

Naturalmente ΔSOC_p varia con la stagione dell'anno. La Figura 5 mostra l'approssimazione lineare, valida per i PV specificati nella Tabella 1, della relazione $\Delta SOC_p = f(S_f)$. S_f è un fattore che tiene conto della variazione stagionale della radiazione solare:

$$S_f = \frac{E_{sun,day}}{\bar{E}_{sun,day}} \quad (3)$$

dove $E_{sun,day}$ e $\bar{E}_{sun,day}$ sono, rispettivamente, l'energia solare giornaliera attuale e quella, sempre giornaliera, mediata su tutto l'anno. La Figura 5 mostra anche la variazione del SOC_f desiderato in funzione del fattore di irraggiamento S_f , calcolato attraverso l'equazione (2). È opportuno sottolineare che, per $S_f < 0.75$, SOC_f è fissato pari a 0.75.

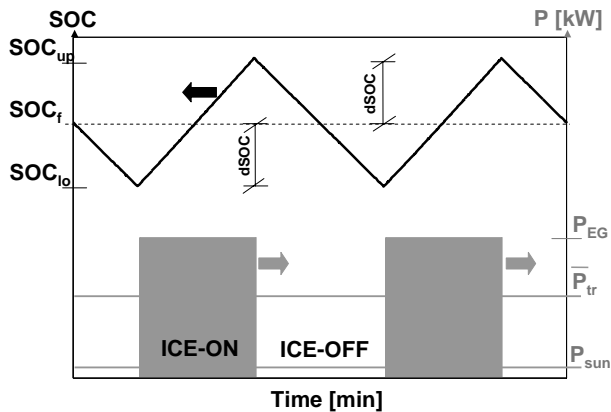


Figura 4 – Rappresentazione schematica della strategia di controllo rule-based per una gestione energetica quasi ottimale di un propulsore HSV serie.

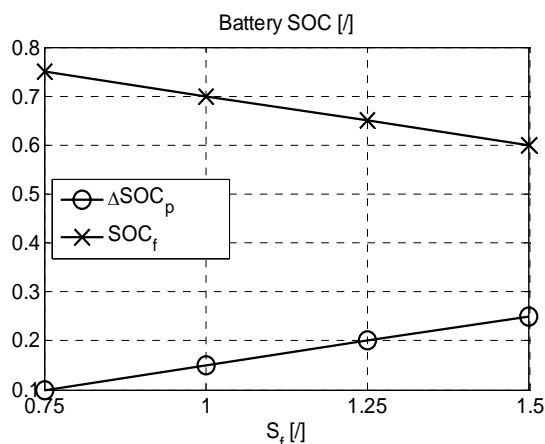


Figura 5 – Variazione del SOC finale ottimale in funzione della radiazione solare giornaliera

REGOLE DEL LOOP INTERNO

Scopo di questo ciclo è quello di individuare lo scheduling (alternando le manovre di start e stop) ottimale del gruppo generatore e il controllo dell'oscillazione del SOC intorno al valore finale indicato dal primo ciclo.

La potenza media richiesta al generatore su un assegnato orizzonte temporale può essere determinata in funzione di: potenza di trazione (tr), potenza dei PV (pv) e frenata rigenerativa (rb)

$$\bar{P}_{EG} = \bar{P}_{tr} - \bar{P}_{PV} - \bar{P}_{rb} \quad (4)$$

Il termine al secondo membro dell'equazione (4) può essere stimato in funzione di valori precedenti, per mezzo di tecniche di previsione (Recursive Neural Network **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**) o, infine, derivandolo da dati GPS. Vale la pena notare che l'equazione (4) si considera valida in corrispondenza del nodo elettrico EN mostrato in Figura 3.

Nel caso di funzionamento intermittente del gruppo ICE-EG, vengono introdotte le seguenti variabili: la durata delle fasi ICE-ON e ICE-OFF, rispettivamente indicate come Δt_{ICE-ON} e $\Delta t_{ICE-OFF}$. Il lasso di tempo che intercorre tra due eventi ICE-ON può essere definito come:

$$\Delta t_{crank} = \Delta t_{ICE-ON} + \Delta t_{ICE-OFF} \quad (5)$$

Il rapporto di intermittenza può quindi essere introdotto ed espresso come:

$$IR = \frac{\Delta t_{ICE-OFF}}{\Delta t_{ICE-ON} + \Delta t_{ICE-OFF}} = \frac{\Delta t_{ICE-OFF}}{\Delta t_{crank}} \quad (6)$$

dove i casi estremi di $IR=0$ e $IR=1$ indicano, rispettivamente, i casi ICE sempre acceso e ICE sempre spento.

È stata sviluppata, poi, una look-up table per la stima ottimale di P_{EG} in funzione di \bar{P}_{tr} e S_f . In particolare, per assegnati \bar{P}_{tr} e S_f , P_{EG} è determinata da una procedura di ottimizzazione espressa dalla seguente equazione:

$$\min_X m_f(X, \bar{P}_{tr}, S_f) \quad (7)$$

con condizioni iniziali:

$$SOC(0) = SOC_f \quad (8)$$

e sottoposta ai vincoli:

$$SOC(\Delta t_{crank}) = SOC_f \quad (9)$$

$$SOC > SOC_f - \Delta SOC_{max,d} \quad (10)$$

Nell'equazione (7) le variabili decisionali X includono: P_{EG} , IR e Δt_{crank} . Una look-up table dell' η_{ICE} viene utilizzata invece per mappare il rapporto tra il consumo di combustibile dell'ICE (m_f) e la P_{EG} . Va sottolineato il fatto che il consumo di combustibile dell'ICE è calcolato tenendo conto degli effetti termodinamici associati al funzionamento intermittente dello stesso [8][17][19].

La Figura 6 mostra un esempio di soluzione al problema espresso dalle equazioni (7-10). In una prima fase la traiettoria del SOC è decrescente poiché si impone che il gruppo ICE-EG sia inizialmente spento; quindi, a valle dell'accensione dell'ICE, la tendenza del SOC è invertita e permette di soddisfare il vincolo espresso dall'equazione (9). La differenza tra SOC_f e SOC_{min} (vedi Figura 6) viene utilizzata per valutare le escursioni del SOC che dovranno essere adottate nella strategia di controllo rule-based rappresentata in Figura 4:

$$dSOC(\bar{P}_{tr}, S_f) = \frac{SOC_f - SOC_{min}}{2} \quad (11)$$

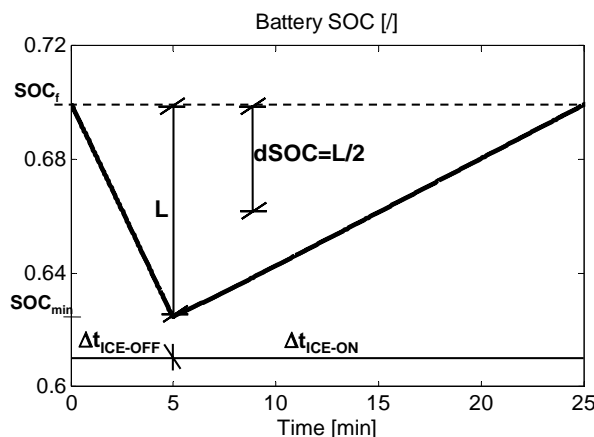


Figura 6 – Esempio di soluzione al problema di ottimizzazione espresso dalle equazioni (7-10).

IMPLEMENTAZIONE DELLA STRATEGIA RULE-BASED

L'architettura di controllo RB globale si compone di tre look-up table:

$$SOC_f = f(S_f) \quad (12)$$

$$P_{EG} = f(\bar{P}_{tr}, S_f) \quad (13)$$

$$dSOC = f(\bar{P}_{tr}, S_f) \quad (14)$$

La Figura 7 fornisce una descrizione schematica dell'implementazione della strategia di controllo rule-based. L'equazione (12) stima l' SOC_f desiderato. Poi, nel loop interno la potenza media cui lavora il gruppo ICE-EG è valutata dall'equazione (13). Le regole ON-OFF per l'ICE-EG dipenderanno dall'escursione del SOC valutata con l'equazione (14). La schema di Figura 7 ha come risultato la logica di controllo rappresentata qualitativamente in Figura 4

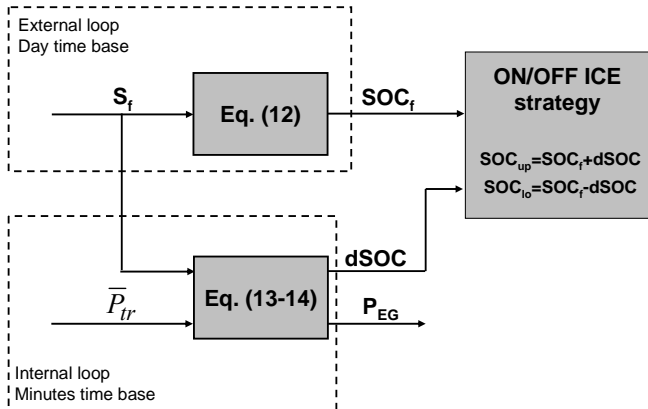


Figura 7 – Rappresentazione schematica delle azioni dei loop esterno e interno nell'ambito della strategia di controllo RB.

Si ritiene opportuno soffermarsi sulla determinazione della potenza media di trazione da fornire in ingresso alle equazioni (13-14). Una possibilità è quella di imporre che \bar{P}_{tr} sia costantemente uguale alla potenza media richiesta alle ruote per cicli di guida comuni, di solito nella gamma da 5 a 10 kW per le autovetture [8]. Tuttavia, i risultati migliori sono attesi laddove \bar{P}_{tr} venga adeguatamente aggiornata durante il percorso di guida, sia deducendola da misurazioni disponibili (i.e. metodo basato su conoscenze a posteriori) o per mezzo di tecniche di previsione (i.e. metodo basato su conoscenze a priori). I casi sopra descritti sono analizzati e discussi nella sezione risultati.

RISULTATI DELLA SIMULAZIONE

Le prestazioni della strategia RB sono stati testate attraverso la simulazione del propulsore HSV, le cui specifiche tecniche sono riportate in Tabella 1. È stato ipotizzato che la fase di guida duri circa 4700 s (cioè $t_{car} = 1,31$ h) e si componga di 4 moduli ECE- EUDC. Le simulazioni sono state eseguite mediante un modello della dinamica longitudinale del veicolo, sviluppato precedentemente dagli autori [7][9][10], in cui si tiene conto anche degli effetti dovuti ai transitori termici dell'ICE.

Tabella 1 – Specifiche dell'HSV e ipotesi considerate nell'analisi di scenario descritta nella Tabella 2.

Specifiche dell'HSV	
Potenza nominale ICE [kW]	46
Combustibile	Diesel
Potenza nominale EG [kW]	43
Potenza nominale EM [kW]	90
Numero moduli di batterie al piombo	27

Capacità batterie	8 kWh
Area orizzontale PV [m ²]	3
Efficienza PV	0.13
Coefficiente di trascinamento (C _d)	0.33
Area frontale [m ²]	2.3
Attrito di rotolamento (C _r)	0.01
Peso [kg]	1500
Ipotesi nell'analisi di scenario	
$\bar{E}_{sun,day}$ ad una latitudine di 30° [kWh/m ² /day]	4.31
Fattore solare S _f	1
h _{sun} [h]	10

Prima di questa indagine numerica, sono state sviluppate le look-up tables espresse dalle equazioni (12-14). I seguenti intervalli sono stati selezionati per le variabili indipendenti: $S_f \in [0 \div 1.5]$, $\bar{P}_{tr} \in [0 \div 11]$ kW

Successivamente, sono state eseguite tre analisi di simulazione, corrispondenti agli scenari delineati nella Tabella 2. In particolare, nel caso 1 il valore di \bar{P}_{tr} in ingresso alle equazioni (13-14) non viene mai aggiornato, mentre nello scenario 2 si è adottata una conoscenza a posteriori per aggiornare \bar{P}_{tr} in funzione delle misurazioni passate di $P_{tr}(t)$. D'altro canto, nello scenario 3, è assunto il caso ideale di perfetta previsione di \bar{P}_{tr} nel successivo orizzonte temporale t_h . Negli scenari 2 e 3, sono state eseguite diverse simulazioni per analizzare anche l'effetto della lunghezza dell'orizzonte temporale sulle prestazioni RB.

Al fine di effettuare un'analisi comparativa delle prestazioni RB, viene valutato il risparmio di combustibile rispetto ad un benchmark di riferimento. Tale benchmark corrisponde alla fuel economy ottenuta con uno scheduling ottimale dell'ICE-EG individuato da una procedura di ottimizzazione basata sui algoritmi genetici [20][21], in cui si assumeva una conoscenza a-priori del ciclo di guida.

La Figura 8 mostra la variazione percentuale di fuel economy [km/l] ottenuta passando dal benchmark di riferimento alla strategia RB, calcolata come:

$$\% \Delta FE = \frac{FE_{GA} - FE_{RB}}{FE_{GA}} \cdot 100 \quad (15)$$

In particolare, secondo l'equazione (15) quanto maggiore è il $\% \Delta FE$ tanto inferiori saranno le prestazioni RB rispetto al benchmark GA. Il primo risultato generale che emerge dalla Figura 8 è che la strategia RB è sempre competitiva rispetto al benchmark di riferimento, con differenze percentuali delimitate tra 0.5 e 5% nell'intervallo t_h analizzato. D'altro canto, il best-case simulato nello scenario 2 è inferiore solo del 3% ai casi RB basati su una conoscenza a-priori del ciclo (scenari 1 e 3). Si può quindi affermare che l'analisi comparativa illustrata in Figura 8 e Tabella 2 dimostra chiaramente le potenzialità offerte da una metodologia euristica (o rule based) per la corretta gestione dei flussi energetici a bordo di un HSV, anche se non basata su una conoscenza a-priori del percorso.

La Figura 9 mostra le traiettorie del tempo di simulazione di P_{tr} , P_{EG} e T_{eng} in corrispondenza dei best-case individuati negli scenari 2 e 3 (vedi Figura 8).

Tabella 2 – Scenari analizzati. Nella colonna centrale, i è un numero intero variabile nell'intervallo:

$$\left[0 \div \frac{t_{ECE-EUDC}}{t_h} \right]$$

Scenario	\bar{P}_{tr} formula	FE _{RB} [km/l]
1	Valore costante: $\bar{P}_{tr} = \bar{P}_{ECE-EUDC}$	22.35
2	Aggiornamento a posteriori: $\bar{P}_{tr}(t) _{t_i < t < t_i + t_h} = \frac{1}{t_h} \int_{t_i - t_h}^{t_i} P_{tr}(t)$	21.73
3	Aggiornamento a priori: $\bar{P}_{tr}(t) _{t_i < t < t_i + t_h} = \frac{1}{t_h} \int_{t_i}^{t_i + t_h} P_{tr}(t)$	22.36

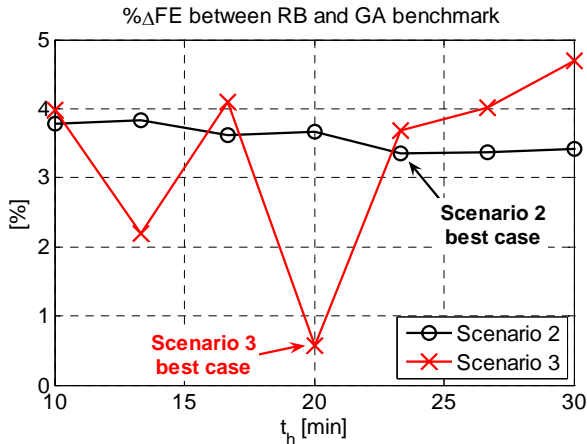


Figura 8 – Variazione di $\% \Delta FE$ in funzione dell'orizzonte temporale di stima di \bar{P}_{tr} .

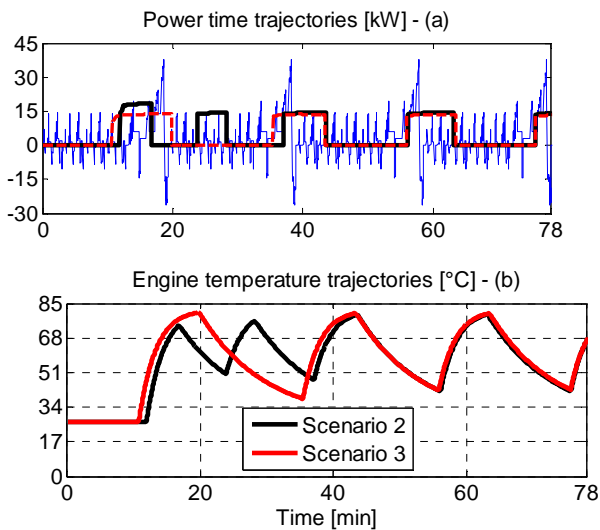


Figure 9 – (a) Simulazione delle traiettorie di potenza. Linea blu: P_{tr} ; Linea nera: P_{EG} nello scenario 2; Linea rossa: P_{EG} nello scenario 3 (b) Simulazione del profilo di temperatura dell'ICE.

In Figura 10 emerge che durante la fase di parcheggio il SOC aumenta oltre il valore iniziale SOC_0 . Tale supplemento di carica della batteria ΔSOC_{ext} è stato contabilizzato nella stima del consumo di combustibile valutando il consumo di combustibile equivalente:

$$m_{f,eq} = m_f - \frac{\Delta SOC_{ext} \cdot C_B}{\bar{\eta}_{ICE-EG} \cdot H_i} \quad (16)$$

dove $\bar{\eta}_{ICE-EG}$ è il rendimento medio stimato per il sistema ICE-EG nel ciclo ECE-EUDC.

La Tabella 2 indica che il consumo di combustibile ottenibile mediante la strategia di controllo RB proposta arriva a superare i 22 km/l. Questo corrisponde a circa il 38% di risparmio di combustibile rispetto ad un veicolo convenzionale con lo stesso rapporto potenza/peso del veicolo HSV simulato (cfr. Tabella 1). Inoltre, il consumo di combustibile dell'HSV simulato è coerente con gli altri risultati numerici presentati in precedenti articoli, con riferimento ad altri propulsori ibridi, come la Toyota Prius, ed allo stesso ciclo di guida (i.e. 19 km/l) [23]. È inoltre opportuno sottolineare come si possano ottenere benefici ulteriori con l'introduzione di tecnologie più avanzate, come le batterie al litio e pannelli PV di nuova generazione ad alta efficienza e/o film fotovoltaici.

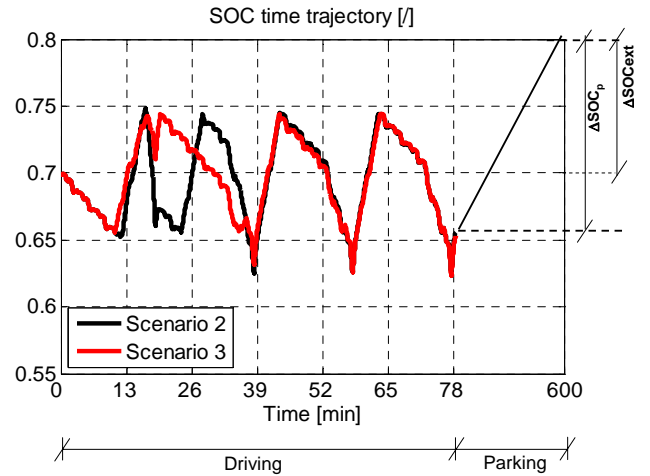


Figure 10 – Simulazione dei profili di SOC.

PROVE SPERIMENTALI

La strategia di controllo RB è attualmente oggetto di indagine sperimentale su di prototipo di veicolo ibrido solare precedentemente sviluppato dal gruppo di ricerca [24]. In particolare, la gestione energetica a bordo è attuata in una unità di controllo programmabile NI-cRIO®, che si interfaccia con il sistema vero e proprio così come descritto in Figura 11. Più in generale, la piattaforma NI-cRIO® assolve ai seguenti compiti:

- Acquisizione dei dati
- Controllo start&stop del gruppo ICE-EG
- Trasferimento dei dati a un server FTP
- Trasferimento dei dati a un server SMTP

Per quanto riguarda il punto b, alcune prove sperimentali preliminari sono state effettuate imponendo soglie fisse di SOC_{lo} e SOC_{up} . La strategia start&stop dell'ICE può quindi essere introdotta in relazione alla stima in tempo reale dello stato di carica corrente. La Figura 12 mostra le traiettorie temporali dei principali segnali acquisiti. In particolare, le Figure 12.a 12.b evidenziano la strategia start&stop attivata dal controllore NI-cRIO® agendo sul corrispondente relè.

Quando è stato eseguita la prova i valori di P_{PV} erano molto bassi, quindi si è scelto di ometterne il grafico per motivi di chiarezza.

Una caratteristica interessante del banco di prova HSV è rappresentata dalla disponibilità di un torsionometro (vedi Figura 12.e), che consente sia la stima precisa della potenza richiesta per la trazione, sia la valutazione del contributo energetico proveniente dalla frenata rigenerativa.

Nella prova sperimentale descritta in Figura 12 è stata ottenuta una fuel economy pari 14 km/l.

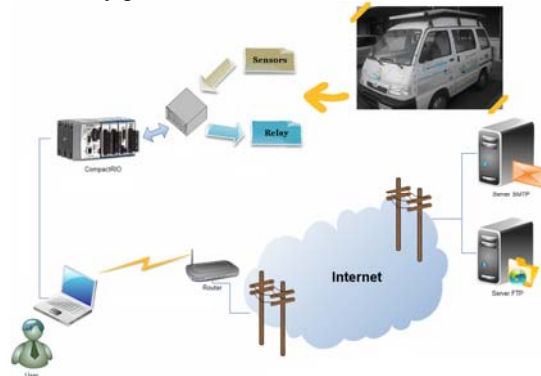


Figura 11 - Descrizione schematica del sistema di acquisizione dati/controllore sviluppato in ambiente NI-cRIO® per il prototipo HSV [24].

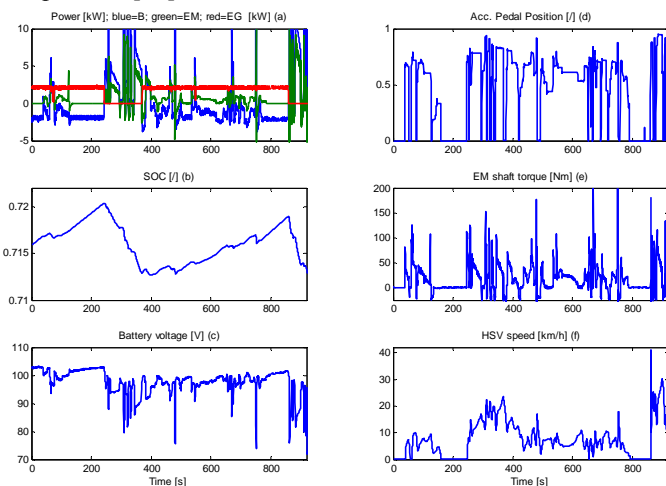


Figura 12 - Test sperimentali preliminari della strategia RB per la gestione dell'energia di un HSV.

CONCLUSIONI

Nella memoria è stata trattata una metodologia euristica (rule-based) per la gestione energetica quasi-ottimale a bordo di veicoli ibridi solari con struttura serie.

Le procedure numeriche sono state realizzate in modo da variare le strategie start&stop del sistema ICE-EG in funzione sia della domanda di potenza di trazione prevista, sia della radiazione solare.

L'architettura di controllo RB si compone di due cicli principali. Il livello esterno (i.e. loop esterno) stima, su una base tempo giornaliera, lo stato di carica da raggiungere alla fine del ciclo di guida. In questo modo, si garantisce che la batteria recuperi completamente l'energia solare captata durante la successiva fase di parcheggio. A livello interno (i.e. loop interno) si stima in tempo reale il livello di potenza a cui far lavorare l'ICE-EG e la variazione del SOC in funzione della domanda attuale di potenza e dell'irradiazione solare attesa.

Sono state eseguite diverse analisi di simulazione per valutare le performance della strategia RB proposta. Le potenzialità

offerte da tale soluzione sono state dimostrate attraverso il confronto con il consumo di combustibile ottenuto con un'ottimizzazione, basata su algoritmi genetici, dello scheduling ottimale dell'ICE sul medesimo ciclo ECE-EUDC. L'analisi numerica ha anche indicato che la strategia RB raggiunge prestazioni soddisfacenti anche senza la previsione della richiesta di potenza futura. Naturalmente, la disponibilità di modelli previsionali garantirà un ulteriore miglioramento della performance.

I lavori futuri si concentreranno, da un lato, sulla possibilità di estendere il numero di analisi ad altri cicli di guida e / o altre architetture HSV e, dall'altro, di sperimentare ulteriormente la strategia RB proposta su un prototipo di HSV.

BIBLIOGRAFIA

- [1] The Kyoto Protocol, http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php
- [2] Retail PV costs, www.solarbuzz.com
- [3] Letendre S., Perez R., Herig C. (2003), Vehicle Integrated PV: A Clean and Secure Fuel for Hybrid Electric Vehicles, Proc. of the American Solar Energy Society Solar 2003 Conference, June 21-23, 2003, Austin, TX.
- [4] Simburger J.T., Simburger E.J., Greg Johanson G., Bagnall M. (2006), "PV Prius", Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, WCPEC-4 2, art. no. 4060162, pp. 2404-2406.
- [5] Statistics for Road Transport, UK Government, www.statistics.gov.uk/CCI/nsc1.asp?ID=8100.
- [6] Arsie I., Marotta M., Pianese C., Rizzo G., Sorrentino M. (2005); Optimal Design of a Hybrid Electric Car with Solar Cells, Proc. of 1st AUTOCOM Workshop on Preventive and Active Safety Systems for Road Vehicles, Istanbul, Sept.19-21, 2005.
- [7] Arsie I., Rizzo G., Sorrentino M. (2006), Optimal Design of a Hybrid Solar Vehicle, AVEC06 - 8th Intl. Symp. on Advanced Vehicle Control - August 20-24, 2006 - Taiwan
- [8] Arsie I., Rizzo G., Sorrentino M. (2007) Optimal Design and Dynamic Simulation of a Hybrid Solar Vehicle, SAE TRANSACTIONS - JOURNAL OF ENGINES 115-3: 805-811
- [9] Saitoh, T.; Hisada, T.; Gomi, C.; Maeda, C. (1992), Improvement of urban air pollution via solar-assisted super energy efficient vehicle. 92 ASME JSES KSES Int Sol Energy Conf. Publ by ASME, New York, NY, USA.p 571-577.
- [10] Seal M.R., Campbell G. (1995), Ground-up hybrid vehicle program at the vehicle research institute. Electric and Hybrid Vehicles - Implementation of Technology SAE Special Publications n 1105 1995.SAE, Warrendale, PA, USA.p 59-65.
- [11] Simpson A., Walker G., Greaves M., Finn D. and Guymer B., (2002) "The UltraCommuter: A Viable and Desirable Solar-Powered Commuter Vehicle", Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC'02, Melbourne, Sep 29 - Oct 2, 2002.
- [12] Arsie, I., Graziosi, M., Pianese, C., Rizzo, G., Sorrentino, M., (2005), "Control Strategy Optimization for Hybrid Electric Vehicles via Provisional Load Estimate", Review of Automotive Engineering, ISSN 1349-4724, Vol. 26, pp. 341-348.
- [13] Baumann B., Rizzoni G. and Washington G. (1998), Intelligent Control of Hybrid Vehicles using Neural Networks and Fuzzy Logic. SAE paper 981061, 1998.

- [14] Powell B.K., Bailey K.E., Cikanek S.R. (1998), Dynamic modeling and Control of Hybrid Vehicle Powertrain Systems. IEEE Transactions on Control Systems, vol. 18, no. 5, 1998.
- [15] Guzzella L. and Amstutz A. (1999), CAE Tools for Quasi-Static Modeling and Optimization of Hybrid Powertrains. IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 48, no. 6, November 1999.
- [16] Ohn H., Yu S., Min K.D.(2008), "Effects of Spark Ignition Timing and Fuel Injection Strategy for Combustion Stability on HEV Powertrain During Engine Restart and Deceleration Driving", Proc .of IFAC World Congress 2008, July 6-11, 2008, Seoul, pp. 5658-5663.
- [17] Arsie I., Di Martino R., Rizzo G., Sorrentino M. (2007) "Toward a Supervisory Control of a Hybrid Solar Vehicle" In: IFAC Symposium "Advances in Automotive Control" AAC07, August 20-22, 2007, Monterey (CA) Edited by:Elsevier.
- [18] Preitl Z., Bauer P., Kulcsar B., Rizzo G., Bokor J. (2007) Control Solutions for Hybrid Solar Vehicle Fuel Consumption Minimization In: Proceedings of the 2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Istanbul, Turkey, June 13-15, 2007.
- [19] Arsie I., Di Martino R., Rizzo G., Sorrentino M (2008), "Energy Management for a Hybrid Solar Vehicle with Series Structure", Proc. of 17th IFAC World Congress, July 6-11, 2008, Seoul.
- [20] Arsie I., Di Martino R., Rizzo G., Sorrentino M. (2008), On the use of genetic algorithm to optimize the on-board energy management of a hybrid solar vehicle, "Les Rencontres Scientifiques de l'IFP - Advances in Hybrid Powertrains", 25-26 November 2008, IFP/Rueil-Malmaison, France.
- [21] Chipperfield, A.J., Fleming, P.J., Polheim, H., Fonseca, C.M., "Genetic Algorithm Toolbox – Matlab Tutorial", Department of Automatic Control and System Engineering - University of Sheffield, www.shef.ac.uk/acse/research/ecrg/getgat.html.
- [22] Burch, S., Cuddy, M., Johnson, V., Markel, T., Rausen, D., Sprik, S., and Wipke, K., (1999), "ADVISOR: Advanced Vehicle Simulator", available at: www.ctts.nrel.gov
- [23] Molyneaux A., Leyland G., Favrat D. (2003), Multi-Objective Optimisation of Vehicle Drivetrains, 3rd Swiss Transport Research Conference, Monte Verita / Ascona, March 19-21, 2003.
- [24] www.eprolab.unisa.it.

PV: Fotovoltaico

RB: Rule based

SOC: Stato di carica della batteria

SOC_f: SOC desiderato alla fine della fase di guida

t_h: Orizzonte temporale nella stima di \bar{P}_{tr} (min)

T_{eng}: Temperatura del motore (°C)

η_{ICE}: Efficienza ICE

DEFINIZIONI, ACRONIMI, ABBREVIAZIONI

B: Batteria

CB: Capacità batteria (J)

EG: Generatore elettrico

EM: Motore elettrico

EN: Nodo elettrico

FE: Consumo di combustibile (km/l)

GA: Algoritmi genetici

h_{car}: Ore di guida (h)

h_{sun}: Energia solare giornaliera disponibile (h)

H_i: Potere calorifico inferiore del combustibile (J/kg)

HSV: Veicolo Ibrido Solare

ICE: Motore a combustione interna

m_f: Consumo di combustibile (kg)

P: Potenza (W)

PEG: Potenza EG (W)

P_{tr}: Potenza di trazione (W)